DOI:10.14113/j.cnki.cn11-1316/j.2012.02.001

□方晓阳；邵　锜；夏　季；王昌燧；潘伟斌；韩庆元
Fang Xiao-yang ;Shao Qi ;Xia Ji ;Wang Chang-sui ;Pan Wei-bin ;Han Qing-yuan

贾湖骨笛的精确复原研究

The Research of Precise Restoration on Jiahu Bone Flute

摘　要 贾湖骨笛是在河南贾湖新石器遗址发现的距今 9000~7500 年的吹管乐器,至今仍然可以演奏。然而,自骨笛发现二十多年以来,学术界对它的研究却并没有达到应有的深度。最主要的原因在于,骨笛经历数千年的埋葬,出土时完好者数量很少。为了防止骨笛意外受损,文物管理部门及博物馆已禁止直接对骨笛进行吹奏测音研究。此举对贾湖骨笛的保护固然非常必要,但同时也使研究者失去了深入考查、研究骨笛的机会。因此,如何精确复制贾湖骨笛并以此作为研究实体,就成为当前必须解决的重要问题之一。笔者首先利用 CT 对贾湖骨笛进行扫描,然后将 CT 扫描得到的二维图像进行三维重建,最后采用紫外激光固化快速成形技术,首次制作出了迄今为止复制精度最高的贾湖骨笛复制品。经过三维测量与测音实验,用本方法复制出的贾湖骨笛模型与实物在物理尺寸与音准上几乎没有误差。

关键词 :骨笛 ;三维重建 ;复原

中图分类号 :J609.2　　**文献标识码** :A　　**文章编号** :1003-0042(2012)02-0100-06

引　言

贾湖骨笛是迄今为止我国历史上最早、形态完整、现今仍可演奏的吹管乐器，是距今 9000～7500 年前中国古代音乐文明最重要的实物载体之一。1999 年，经中国科技大学科技考古研究室和外方专家通力合作,英国科学杂志《自然》以《贾湖新石器遗址发现最古老的可演奏乐器》[①] 为题,介绍了贾湖骨笛的基本信息,世界各大媒体纷纷报道,引起全球广泛关注,尤其是英国科学杂志《自然》网站上用骨笛

作者简介 :方晓阳(1956~),男,博士,中国科学院研究生院人文学院教授、博士生导师。(北京 100049)
邵锜(1983~),男,中国科学院研究生院人文学院科技史与科技考古系硕士研究生。(北京 100049)
夏季(1976~),男,中国科学院研究生院人文学院科技史与科技考古系博士后。(北京 100049)
王昌燧(1947~),男,中国科学院研究生院人文学院科技史与科技考古系教授、博士生导师。(北京 100049)
潘伟斌(1968~),男,河南省文物考古研究所副研究员。(河南 郑州 450000)
韩庆元(1952~),男,武警河南总队医院放射科主任。(河南 郑州 450052)

① Juzhong Zang, Garman Harbottle, Changsui Wang & Zhaochen Kong. Oldest playable musical instruments found at Jiahu early Neolithic site in China. Nature, 1999, Volume 401, pp.366~368.

演奏的中国民歌《小白菜》,更令人耳目一新。

由于贾湖骨笛是用大型鸟类翅膀的尺骨制作而成,故骨管的长短、粗细、厚薄与内腔形状都会因鸟类个体的不同而不同。在没有金属工具与音乐物理知识的距今9000～7500年前,贾湖先民是如何将这种内腔异形的骨管制作成音阶分明的乐器?这种音阶与后世的音律有何关系?这些值得深入研究的问题曾引起许多考家学者的极大兴趣。1987年11月3日,黄翔鹏、童忠良、萧兴华、徐桃英、顾伯宝诸先生用Stroboconn闪光频谱测音仪对当时出土最完整的M282:20号骨笛进行了音序测试[②],并对M341:2号与M341:1号骨笛进行了比较研究[③];1992年童忠良、蒋朗蟾、荣政、李幼平等率先以M282:20、M282:21、M78:1三支骨笛为复制对象经精密测量后仿制出5支七孔骨笛[④]。随后中国艺术研究院音乐研究所王子初先生以骨笛M78:1为复制对象,手绘图纸后用骨粉加胶混合模制而成若干根骨笛。[⑤] 1999年阎福兴委托杨中市常敦明用鹤骨制作了2支骨笛[⑥],但与贾湖骨笛的开孔与吹奏模式都存在很大不同。2003年5月中国科技大学考古系,徐飞、夏季、王昌燧在《中国原始音乐声学成就数理分析——贾湖骨笛研究》一文中介绍了使用塑料管仿制的骨笛进行模拟测音的情况[⑦];2005年泉州师范艺术学院李寄萍采用当地火鸡腿骨对M282:20、M511:4两支骨笛进行仿制,并利用斜吹法和指法的实验展开对贾湖先民音律及音乐活动的分析与推测[⑧];2006年中国艺术研究院研究生孙毅采用鹤尺骨,按照《舞阳贾湖》考古报告中所公布的尺寸,用手工和钻孔设备制作出M282:20、M253:4两支骨笛的复制品并进行了测音[⑨]。此外,北京联合大学陈其翔先生、中国科学院声学所陈通与中国科学院科学史所戴念祖先生、温州大学音乐学院陈其射先生、天津音乐学院徐荣坤与郭树群先生等也从多个角度对贾湖骨笛进行了研究。[⑩] 然而,鉴于贾湖骨笛珍贵的文物价值,为免再次受到自然和人为损坏,现存骨笛均被封藏,不用说再次吹奏测音,就连见上一面都很困难,这无疑为贾湖骨笛的"律"、"调"研究带来了很大的困难。如何在不损伤贾湖骨笛实物的原则下继续进行贾湖骨笛的测音与"律"、"调"研究,也就成了音乐史界必须解决的关键性问题。笔者非常赞同郑祖襄先生提出的"首先制定一个科学的骨笛修复方案,修复的方法也不一定对原件进行修复;为了保存原件,是否可以考虑运用先进的科技手段进行复制,然后用复制品来测音"[⑪] 的建议,利用医学影像学、计算机辅助逆向工程设计、mimics三维重建、激光成型多种技术,制作出一种几何形状与物理尺寸均与贾湖骨笛实物几乎完全相同的复原品并进行测音实验,草成此文,希冀学界不吝赐教。

复原实验

1. 复原对象选择

骨笛标本M511:4,是2001年春对贾湖遗址进行了第7次发掘时发现的。"最长25.15厘米,保存基本完整,通体棕色光滑,两端均有骨关节残存,似为照顾一定长度所留,出土时分为两节,并列放置于乙的乱骨中,经缀合为一支,断碴在第三孔中间处,在

---

② 黄翔鹏:《舞阳贾湖骨笛的测音研究》,《文物》1989年第1期。

③ 萧兴华:《中华音乐文化文明九千年——试论河南舞阳贾湖骨笛的发掘及其意义》,《音乐研究》2000年第1期。

④ 童忠良:《舞阳贾湖骨笛的音孔设计与宫调特点》,《中国音乐学》1992年第3期。

⑤ 孙毅:《舞阳贾湖骨笛音响复原研究》,中国艺术研究院2006届硕士学位论文。

⑥ 阎福兴:《让鹤骨笛声复活》,《葫芦岛晚报》2007年6月29日。

⑦ 夏季、徐飞、王昌燧:《新石器时期中国先民音乐调音技术水平的乐律数理分析——贾湖骨笛特殊小孔的调音功能与测音结果研究》,《音乐研究》2003年第1期。

⑧ 李寄萍:《骨笛仿古实验及分析推测》,《天籁》2005年第2期。

⑨ 孙毅:《舞阳贾湖骨笛音响复原研究》,《中国音乐学》2006年第4期。

⑩ 陈其翔:《舞阳贾湖骨笛研究》,《音乐艺术》1999年第4期。陈通、戴念祖:《贾湖骨笛的乐音估算》,《中国音乐学》2002年第4期。陈其射:《河南舞阳贾湖骨笛音律分析》,《天籁》2005年第2期;《上古"指宽度律"之假说——贾湖骨笛音律分析》,《音乐艺术》2006年第2期。徐荣坤:《析舞阳骨笛的调高和音阶》,《天籁》2006年第1期。郭树群:《上古出土陶埙、骨笛已知测音资料研究述论》,《天籁》2006年第3期。

⑪ 郑祖襄:《关于贾湖骨笛滑音数据及相关论证问题的讨论》,《中国音乐学》2003年3期,第54页。

二、三孔之间可见缠裹痕，在骨笛正面钻 7 个音孔，孔较圆，外径略大于内径，外径 0.4 厘米—0.5 厘米，内径 0.3 厘米—0.4 厘米之间，每个音孔旁均有刻记，在孔最大径处，未见二次刻记，可见为一次刻记即施钻孔，在北面距吹口端 6.89 厘米处有一横刻痕，位于第一孔之上位置，可能也是设计刻记，孔列基本为一直线，但第一孔稍向右偏 1/3 孔位。”[12]（见图 1）

图 1：M511:4 骨笛实物

选择此骨笛的原因：其一是该骨笛出土时虽断为两截，但经清洗缀合，外观形态完整，骨笛内壁也无明显残留物，是现今河南省考古文物研究所保存骨笛中形体最为完整者之一；其二是该骨笛曾由对斜吹法有精深研究的刘正国先生进行试吹[13]，王昌燧、徐飞、夏季进行了录音与测音，数据公开发表在《音乐研究》2004 年第 1 期上[14]，其相关数据可与本精确复制骨笛的测音结果进行有效比对。

2. CT 断层扫描

骨笛精确复原，数据采集是关键的第一步，只有获得精确的测量数据，才能进行三维重建。一般的接触式测量虽然精度较高，可以在测量时根据需要选择有效测量部位，做到有的放矢，避免采集大量冗余数据。但测量速度较慢且只能获得骨笛的外部尺寸，不能立体、全方位地反映骨笛内部髓腔的解剖信息，也不易进行三维重建。激光扫描虽然具有精度较高、测量速度较快的特点，扫描数据易于进行三维重建，但是由于骨笛内部髓腔为其扫描盲区，所以即使进行三维重建，也仍然不能获得反映骨笛内部髓腔的解剖信息。目前随着 CT 扫描精度的不断提高以及功能强大的计算机软件的开发，完全能满足三维重建所需的高精度、立体化、全方位的数据采集，使骨笛的精确复制成为可能。

本实验选用的是飞利浦公司出产的 64 照排的医学 CT。扫描条件：选择骨组织窗扫描，层厚为 0. 625mm，扫描探头工作电压电流为 120kV/246mA，骨笛长轴与 CT 扫描线垂直，由骨笛吹口端至尾部进行横断面扫描。总共获取断层影像 823 张，在 CT 工作站中转为医学影像学标准格式 DICOM 格式存储。每张图片大小为 125× 125 mm^2，分辨率为 540× 540，每个像素占体积 0.23× 0.23× 0.625mm^3。

3. 数据处理及三维重建

首先是将经过 CT 扫描的 DICOM 图像文件输入到 DELL 图形工作站里，对图像像素按灰度进行定限分离，排除游离误差，去除噪声干扰点，然后利用 Materiaise 公司出产的软件 Mimics10.01 进行三维重建。用此方法重建的骨笛立体图（图 2）理论误差为 0.1 毫米。

图 2：在 mimics10.01 下重构的 M511:4 骨笛立体图

4. 固化成型

紫外激光快速成型是出现较早、技术最成熟和应用最广泛的快速原型技术。笔者选择该技术的原因主要是：其一该技术系统工作稳定，全过程自动运行；其二尺寸精度较高，可确保复制品的尺寸精度在 0.1 毫米以内；其三是表面质量较好，可保证工件表面光滑；其四是系统分辨率较高，能构建复杂结构的工件。本研究中笔者将三维重建后的骨笛用 STL 文件副本格式保存，输入到激光快速成型机上。在计算机的控制下，按照截面轮廓的要求，用紫外激光束照射树脂液槽中的液态光敏树脂，使被扫描区域的树脂固化，得到该截面轮廓的固化树脂薄片。然后，进行第二层激光扫描固化，并使新固化的一层牢固地黏结在前一层上，如此重复直到整个产品成型完毕。取出工件后进行清洗和内外表面光洁处理，就制作出了与原贾湖骨笛物理尺寸几乎没有误差的精确复

图 3：上为 M511:4 贾湖骨笛实物，
下为 M511:4 贾湖骨笛实物的精确复原品

⑫ 中国科学技术大学科技史与科技考古系、河南省文物考古研究所、舞阳县博物馆：《河南舞阳贾湖遗址 2001 年春发掘简报》，《华夏考古》2002 年第 2 期，第 28 页。

⑬ 刘正国：《贾湖遗址二批出土的骨龠测音采样吹奏报告》，《音乐研究》2006 年第 3 期。

⑭ 徐飞、夏季、王昌燧：《贾湖骨笛音乐声学特性的新探索——最新出土的贾湖骨笛测音研究》，《音乐研究》2004 年第 1 期。

原品。该复原品的材质虽然为紫外固化树脂，但因误差控制在毫米级，故复原的骨笛（图 3 下）内外壁几何形状与物理尺寸与 M511:4 骨笛实物（图 3 上）非常接近，是一根形态完整的 M511:4 骨笛的高精度复原品。

测音实验

1. 骨笛实物测音

2001 年王昌燧、徐飞、刘正国、夏季等对 M511:4 骨笛实物进行了测音实验研究，低八度区测音数据如表 1 所示。

表 1 M511:4 号骨笛低八度区测音数据

孔号		筒音	1	2	3	4	5	6	7
筒音到7孔	音高	E5+32	G5+41	A5+18	B5+10	C6+31	D6-43	E6+46	F6+43
		E5+35	G5+41	A5+19	B5+4	C6+32	D6+55	E6+55	F6+43
		E5+34	G5+34	A5	B5-5	C6+30	D6-43	E6+46	F6+43
		E5+42	G5+43	A5-1	B5+1	C6+31	D6-41	E6+43	F6+43
7孔到筒音	音高	E5+54	G5+54	A5+30	B5+12	C6+30	D6-40	E6+38	F6+44
		E5+34	G5+34	A5-1	B5+1	C6+32	D6-65	E6+30	F6+42
		E5+30	G5+33	A5+13	B5+13	C6+37	D6-40	E6+45	F6+40
		E5+38	G5+37	A5+13	B5+19	C6+33	D6-41	E6+47	F6+39
平均值		E5+37	G5+40	A5+13	B5+9	C6+33	D6-45	E6+44	F6+43 1517.4
音程差			300	173	196	124	222	189	199
C 调音名		3	5	6	7	1	2	3	4
标准音程差			300	200	200	100	200	200	200
音分误差			3	-27	-4	24	225	-11	-1

2. 骨笛精确复原品测音

2009 年 4 月 23 日 21 时 15 分，由方晓阳对 M511:4 骨笛精确复原品进行了测音。室温：20℃。录音工具：东芝 2010 笔记本电脑，高灵敏度立体声电容式话筒。录音软件：Cool Edit Pro 2.0。录音采样率为 44.1 KHz，声道为立体声，采样精度 16 位。吹奏方法：斜吹法（与刘正国 2001 年测音时的吹奏方法相同），上下行各吹奏十遍。测音分析软件：Cool Edit Pro 2.0，取物理音高标记法 A4=440Hz（即通用第一国际音高 a^1=440Hz），共获得 16 组 160 个数据（表 2、表 3），然后计算均值得到精确复原品低八度区音律特征表（表 4）。

表 2 M511:4 骨笛精确复原品低八度区下行测音数据（单位：Hz）

全开	1586.4	1599.8	1508.6	1589.7	1585.8	1580.8	1576.5	1548.3	1592.7	1578
开 6 孔	1362.7	1342.9	1353.2	1369.4	1350.9	1349.5	1358.3	1326.4	1357.5	1361.1
开 5 孔	1204	1187.4	1196.8	1210	1191.6	1194.8	1183.6	1178.6	1200	1197.4
开 4 孔	1074.5	1056.3	1073	1075.8	1058.6	1057.3	1502.9	1045.5	1067.9	1066.4
开 3 孔	1018	996.89	1019.3	1010.4	1006.1	1005	997.04	998.15	1008.5	1012.6
开 2 孔	896.53	886.82	902.07	896.97	892.35	883.67	892.95	871.32	893.2	888.82
开 1 孔	805.37	797.45	805.32	801.49	797.5	802.95	790.69	790.42	801.65	795.99
全闭	667.94	657.16	666.6	664.53	662.45	662.43	658.74	653.52	662.47	670.06

表 3 精确复原品低八度区上行测音数据(单位:Hz)

全开	1586.2	1576.7	1586.1	1579.4	1581.8	1575.5	1551.1	1576.5	1598.1	1579.7
开 6 孔	1350.7	1379.8	1346.1	1336.1	1350.5	1335.7	1314	1343.8	1332.1	1349.2
开 5 孔	1198.8	1202.2	1198.8	1197.5	1193	1187.3	1169.1	1197.1	1186.4	1198.9
开 4 孔	1064.1	1066.1	1068.6	1062.5	1043.4	1049.1	1039.6	1069.6	1050.1	1067.9
开 3 孔	999.62	999.3	997.73	995.41	998.41	998.11	985.63	997.39	1003.3	1000.5
开 2 孔	887.54	890.17	891.55	886.17	877.06	890.61	880.82	888.97	889.57	894.24
开 1 孔	797.17	795.77	797.76	785.1	787.9	792.13	785.12	785.31	789.72	790.42
全闭	671.37	668.75	667.73	660.81	663.9	664.34	662.14	660.27	666.94	664.54

表 4 精确复原品低八度区音律特征表

发音孔位		筒音	1	2	3	4	5	6	7
上行发音均值	频率(Hz)	665.08	790.64	887.67	996.54	1058.1	1192.81	1343.8	1578.21
	音高	E5+15	G5+14	A5+15	B5+15	C6+19	D6+26	E6+32	G6+11
下行发音均值	频率(Hz)	662.59	798.85	890.47	1007.2	1062.82	1194.42	1353.19	1581.86
	音高	E5+8	G5+32	A5+20	B5+33	C6+26	D6+28	E6+44	G6+15
上下行均值	频率(Hz)	663.84	794.75	889.07	1001.87	1060.46	1193.62	1348.50	1580.04
	音高	E5+12	G5+23	A5+18	B5+24	C6+23	D6+27	E6+38	G6+13
音程差(阴分)			311.60	194.16	206.79	98.36	204.78	211.21	274.33
C 调音名		$\underset{\cdot}{3}$	$\underset{\cdot}{5}$	$\underset{\cdot}{6}$	$\underset{\cdot}{7}$	1	2	3	5
标准音程差(阴分)			300	200	200	100	200	200	200
音分误差			11.6	- 5.84	6.79	- 1.61	4.78	11.21	- 25.67

表 5 M511:4 号骨笛实物与精确复原品低八度区发音均值比较

发音孔位		筒音	1	2	3	4	5	6	7
发音均值	骨笛实物	E5+37	G5+40	A5+13	B5+9	C6+33	D6- 45	E6+44	F6+43
	精确复原品	E5+12	G5+23	A5+18	B5+24	C6+23	D6+27	E6+38	G6+13
音分误差绝对值		25	17	5	15	10	14	6	130

结果与讨论

1. 前人对贾湖骨笛音律的研究主要集中在对骨笛实物直接吹奏测音[15],以及根据已发表的贾湖骨笛

⑮ 黄翔鹏:《舞阳贾湖骨笛的测音研究》,《文物》1989 年第 1 期。萧兴华:《中华音乐文化文明九千年——试论河南舞阳贾湖骨笛的发掘及其意义》,《音乐研究》2000 年第 1 期。萧兴华、张居中、王昌燧:《七千年前的骨管定音器——河南省汝州市中山寨十孔骨笛测音研究》,《音乐研究》2001 第 2 期。夏季、徐飞、王昌燧:《新石器时期中国先民音乐调音技术水平的乐律数理分析——贾湖骨笛特殊小孔的调音功能与测音结果研究》,《音乐研究》2003 年第 1 期。徐飞、夏季、王昌燧:《贾湖骨笛音乐声乐特性的新探索——最新出土的贾湖骨笛测音研究》,《音乐研究》2004 年第 1 期。刘正国:《贾湖遗址二批出土的骨龠测音采样吹奏报告》,《音乐研究》2006 年第 3 期。

测量数值与测音数据进行讨论与推理⑯。由于现存贾湖骨笛实物已经很难再容人们对其进行直接吹奏测音,因此要想深入研究贾湖先民选择音律的规律,当务之急是设法对骨笛进行修复,必须要对更多的骨笛进行测音研究。利用 CT 扫描、计算机辅助逆向工程设计、Mimics 三维重建、紫外激光快速成型技术对贾湖骨笛进行精确复原,所得到的复原品与原骨笛的误差可控制在毫米级,从而使复原品与原骨笛无论在外观还是内腔的几何形态与物理尺寸上高度相似。利用这种精度复原方法制作贾湖骨笛的高精度复制品,对贾湖骨笛的深入研究,可能会产生一些重要的影响与推动作用。

2. 通过对贾湖骨笛实物与精确复原品在低八度区发音均值比较(详见表 5),贾湖骨笛实物与精确复原品在发音孔位筒音、1、2、3、4、6 孔的均值的音分误差绝对值分别为 25、17、5、15、10、6 个音分。发音孔位 5 的发音均值,徐飞等人测定为 D-45,而笔者通过对刘正国当年测音录像上截取的相应音频进行测量,其结果却为 D6+41,其音分误差绝对值应为 14。对骨笛实物与精确复原品在 7 孔全开时发音均值误差很大的原因,笔者通过骨笛实物与精确复原品的测量比较,以及根据 Mimics 与紫外激光快速成型的理论误差均为 0.1 毫米进行推断,由于精确复原品与贾湖骨笛实物在内外管壁形态、音孔内外孔径、音孔间距等方面的物理尺寸几乎完全相同,因此精确复原品与贾湖骨笛实物在 7 孔全开的音高均值理应高度近似。出现较大误差的原因主要是来自于吹奏者在吹奏此音时对气流控制的不同。因为笔者在对该精确复原品吹奏时发现,如果对气流进行控制,完全可以使该音孔发出 F6+43 与 G6+13 两种音。

3. 本实验制作的复原品材质为紫外固化树脂,其声学特性尤其是音色上与原骨笛相比具有较大的差异。不过由于边棱类吹奏乐器的音高在口风相同时主要决定于该乐器内腔的物理形态,而与材质关系不大,故所获测音数据也应该接近于原骨笛,可以考虑用来代替贾湖骨笛实物,供研究者们进行测音,以及其他音律学方面的研究,但不适合于用于音色比较研究。

4. 本实验制作的复原品的测音数据仅为一人吹奏的结果,与其他人吹奏的结果是否存在较大差别还有待进一步检测。为此,笔者殷切期望有更多的音乐研究者,对复制骨笛的吹奏方法与“调”、“律”等进行更加深入的研究。

附言:本文为国家自然科学基金资助项目(批准号 10520403)。感谢 Materialise 中国上海代表处为本研究提供软件以及相关的技术支持。

(责任编辑 郭 威)

⑯ 童忠良:《舞阳贾湖骨笛的音孔设计与宫调特点》,《中国音乐学》1992 年第 3 期。陈其翔:《舞阳贾湖骨笛研究》,《音乐艺术》1999 年第 4 期。陈通、戴念祖:《贾湖骨笛的乐音估算》,《中国音乐学》2002 年第 4 期。郑祖襄:《贾湖骨笛调高音阶再析》,《音乐研究》2004 年第 4 期。陈其射:《河南舞阳贾湖骨笛音律分析》,《天籁》2005 年第 2 期;《上古“指宽度律”之假说——贾湖骨笛音律分析》,《音乐艺术》2006 年第 2 期。徐荣坤:《析舞阳骨笛的调高和音阶》,《天籁》2006 年第 1 期。郭树群:《上古出土陶埙、骨笛已知测音资料研究述论》,《天籁》2006 年第 3 期。